

Performance evaluation and factors affecting nitrogen removal in horizontal subsurface-flow constructed wetlands for municipal wastewater treatment under hot and semi-arid climate conditions

Reza Hajisharafi¹, Ali Afrous^{2✉}, Ehsan Derikvand³, Saeb Khoshnavaz⁴

1. Department of Civil Engineering- Water Resources Engineering and Management , Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

2. Department of Environmental Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: afrous@iau.ac.ir

3,4. Department of Water Science Engineering, Water Science and Environmental Research Center, Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 August 2026
Accepted 16 September 2026

Keywords:
Municipal wastewater treatment, Horizontal subsurface wetland, Hydraulic retention time (HRT), Phytoremediation, Nitrification, Hot and Semi-arid climate.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the performance of a horizontal subsurface-flow constructed wetland system (HSSF-CW) for removing nitrogen compounds from municipal wastewater in hot, semi-arid conditions in Dezful County, Iran. Four separate, parallel, pilot-scale units were constructed and operated outdoors. These comprised an unplanted control unit and units planted with either common reed (*Phragmites australis*) or vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), or both. Performance was evaluated at three hydraulic retention times (HRTs) of 3, 4 and 5 days in terms of the removal of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$). Sample analyses were conducted according to standard APHA methods. The results showed that under the experimental conditions, the vegetated units exhibited higher TN removal rates than the unplanted control unit. The highest TN removal (54.32%) was observed in the mixed-planted unit at an HRT of 5 days. The vetiver-planted unit also showed TN removal of around 49.75%, indicating performance close to that of the mixed-planted unit. This suggests that vetiver could be investigated further in future studies. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal ranged from 35.25% to 56.08% across the tested conditions. An increase in the concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the effluent relative to the influent was observed in the treatment units. This is consistent with the occurrence of partial nitrogen transformation processes, including ammonium oxidation. However, the specific pathways of these transformations were not investigated directly. The incomplete TN removal and increased effluent nitrate concentrations suggest that sustained nitrogen removal requires suitable conditions for the various nitrogen transformation and retention processes. Overall, the HSSF-CW system reduced part of the nitrogen load in municipal wastewater in a hot, semi-arid climate. Incomplete TN removal and increased effluent nitrate concentrations suggest that sustained nitrogen removal requires suitable conditions for various nitrogen transformation and retention processes. Overall, the HSSF-CW system reduced part of the nitrogen load in municipal wastewater under Dezful's hot semi-arid conditions. However, given the descriptive nature of this study and the absence of independent replication at the treatment level, the definitive effects of HRT and vegetation on nitrogen removal cannot be determined. Future studies incorporating replicated experimental designs, hydraulic tracer testing and monitoring of relevant process variables are required.

Introduction

Horizontal subsurface-flow constructed wetlands (HSSF-CWs) have gained widespread acceptance across developing regions and resource-constrained communities as decentralised, low-maintenance wastewater ecotechnologies (Stefanakis, 2020; UN-Habitat, 2008). Although particulate settling and carbonaceous biochemical oxygen demand (BOD_5) degradation are reliable processes in these systems, the efficiency of total nitrogen (TN) removal remains notoriously unpredictable and is typically restricted to modest ranges between 30% and 50% (Vymazal et al,

2021; Lam et al., 2024). Complete nitrogen removal requires the use of both aerobic and anaerobic pathways: first, autotrophic nitrification of ammonium ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) into nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), and then heterotrophic denitrification, whereby nitrate is sequentially reduced to inert dinitrogen gas (N_2) in the presence of biodegradable carbon electron donors (Tang et al., 2020; Wu et al., 2023). In classic HSSF configurations characterised by continuous saturated flow regimes, dissolved oxygen (DO) transfer rates are strictly limited, generating predominantly anoxic or reducing conditions (Kadlec and Wallace, 2009). This

Cite this article: Hajisharafi, R., Afros, A., Derikvand, E., Khoshnavaz, S. (2026). Performance evaluation and factors affecting nitrogen removal in horizontal subsurface-flow constructed wetlands for municipal wastewater treatment under hot and semi-arid climate conditions. Journal of Engineering Geology, 20 (2), 128-147. <https://doi.org/10.22034/jeg.2026.137813.1003>

hypoxia hinders complete nitrification unless emergent macrophytes release sufficient oxygen from their aerenchymatous root networks into localised rhizospheric microzones (Kataki et al., 2021). Conversely, if nitrification does occur, deep beds often exhaust readily biodegradable organic carbon, leaving denitrifying consortia carbon-deprived. These kinetic tensions are exacerbated in hot, semi-arid regions such as southwestern Iran, where high ambient temperatures accelerate microbial kinetics, but also promote high evapotranspiration. This process concentrates non-volatile solutes and alters hydraulic dynamics (Gholipour, 2025). Although *Phragmites australis* has traditionally been the preferred botanical choice for Mediterranean and Middle Eastern wetlands, vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) is emerging as a promising phytoremediation candidate thanks to its extensive root system, rapid biomass accumulation and high tolerance of heat and salinity (Rahman et al., 2020; Swarnakar et al., 2022). However, rigorous comparative evaluations assessing monospecific versus polyculture macrophyte beds under systematic hydraulic retention variations in hot semi-arid conditions are lacking. This study aims to quantify the comparative removal of nitrogen species (total nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen) across control, *Phragmites*, *Chrysopogon*, and polyculture HSSF-CW pilot systems with different HRTs. This will identify primary kinetic constraints to inform the design of full-scale ecological engineering projects.

Materials and Methods

The experimental setup was conducted outdoors at the Dezful Municipal Wastewater Treatment Plant in southwestern Iran (elevation 143 m, Köppen climate classification BSh, mean annual temperature 24.4 °C, summer maximums >50 °C). The pilot infrastructure consisted of four parallel rectangular masonry beds (length 7.00 m, width 0.80 m, total depth 0.60 m, bottom slope 1%). Each bed had an effective treatment length of 6.00 m and was lined with a 1.0 mm high-density polyethylene (HDPE) geomembrane. The geomembrane was bounded by inlet and outlet gravel manifolds, each 0.50 m long. The substrate profile comprised three stratified layers: a bottom drainage layer of coarse washed gravel (diameter 20–40 mm; hydraulic conductivity $K_s = 1500$ m/d) with a thickness of 15 cm; an intermediate distribution layer of gravel (diameter 8–12 mm; $K_s = 600$ m/d) with a thickness of 15 cm; and a top root-zone layer of washed pea gravel mixed with native sandy loam ($K_s = 8$ m/d) with a thickness of 25 cm. The operating liquid depth was maintained 5 cm below the substrate surface, resulting in an effective pore volume of approximately 1.00 m³ (porosity $n \approx 0.38$). Four operational configurations were established: an unplanted control; a *Phragmites australis* monoculture;

a *Chrysopogon zizanioides* monoculture; and a 1:1 polyculture bed combining both species at a total planting density of 25 stems/m². Following a 30-day biological acclimatisation period involving incrementally concentrated wastewater (25% to 100%), the beds were operated under three descending nominal hydraulic retention times (HRTs): Five days ($Q = 0.200$ m³/d; HLR = 0.042 m/d), four days ($Q = 0.250$ m³/d; HLR = 0.052 m/d) and three days ($Q = 0.333$ m³/d; HLR = 0.069 m/d). Following a seven-day stabilisation period after each flow adjustment, grab samples were collected twice daily for five consecutive days per hydraulic regime (10 paired samples per unit per HRT; 150 water samples in total). Primary-settled municipal effluent was used as the influent (mean TN: 41.14 ± 1.67 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 30.46 ± 1.77 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 1.03 ± 0.09 mg/L, COD 237.13 ± 23.38 mg/L, DO 0.90 ± 0.17 mg/L and temperature 33.56 ± 2.06 °C). Physicochemical analyses were performed according to Standard Methods (APHA, 2023): TN was analysed using alkaline persulfate digestion, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ using the phenate spectrophotometric method and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ using ultraviolet spectrophotometric screening. Removal efficiencies were calculated on a concentration basis. Statistical analyses were performed in R 4.3 to determine central tendencies, dispersion metrics and temporal coefficients of variation.

Results and Discussion

The influent nitrogen was dominated by reduced species, with ammonium accounting for 74.04% of the total nitrogen (TN), whereas oxidised nitrate represented only 2.50%. Throughout the experiment, the presence of wetland vegetation significantly improved nitrogen attenuation compared to the unvegetated control. TN removal in the control bed remained modest, yielding $31.12\% \pm 6.49$ at an HRT of 3 days (effluent: 28.43 mg/L), $31.82\% \pm 6.11$ at 4 days (effluent: 27.94 mg/L) and $34.67\% \pm 5.06$ at 5 days (effluent: 26.79 mg/L). In planted configurations, extending the nominal HRT from 3 to 5 days progressively increased TN reduction. The *Phragmites* monoculture achieved total nitrogen (TN) removal efficiencies of $46.05 \pm 3.50\%$, $47.13 \pm 2.60\%$ and $49.91 \pm 3.19\%$ across HRTs of 3, 4 and 5 days respectively (with effluent TN dropping to 20.53 ± 0.98 mg/L at 5 days). The *Chrysopogon* monoculture exhibited comparable and resilient performance, achieving removals of $47.63 \pm 2.61\%$, $49.15 \pm 2.80\%$ and $49.75 \pm 3.98\%$ over the same sequence. The mixed-vegetation system recorded the highest treatment efficacy across all retention periods: 51.55% at 3 days, 50.34% at 4 days and 54.32% at 5 days (with an effluent TN of 18.70 mg/L).

Ammonium nitrogen reductions followed a similar trend, with removal efficiencies ranging from 35.25% to 56.08%. In the unplanted control, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal efficiencies ranged from $35.25\% \pm 4.85\%$ (HRT 4 d) to $37.15\% \pm 5.55\%$ (HRT 5 d). The presence of macrophytes enhanced ammonium abatement: *Phragmites* achieved 49.64% to 51.78% abatement; *Chrysopogon* achieved 51.42% to 51.74% abatement; and the polyculture bed yielded peak abatement of $55.12\% \pm 2.96\%$ (HRT 3 d) and $56.08\% \pm 3.55\%$ (HRT 5 d). The effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration was 13.09 ± 0.48 mg/L. Conversely, effluent nitrate concentrations increased systematically across all units compared to influent levels. In the control group, the effluent nitrate concentration reached 5.09–5.40 mg/L (net generation: +4.03 to +4.41 mg/L). Vegetated systems had slightly lower effluent nitrate accumulations than the control unit, with discharges of 3.90–4.23 mg/L in the *Phragmites* unit, 3.91–4.11 mg/L in the *Chrysopogon* unit, and 3.55–3.87 mg/L in the mixed bed unit (net generation: +2.50 to +2.84 mg/L). The polyculture unit exhibited the lowest effluent temporal variability (quantified via the coefficient of variation) at HRT 5 days (3.69% for TN and 3.67% for $\text{NH}_4^+ - \text{N}$), reflecting higher temporal stability.

Conclusions

The concurrent reduction of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and accumulation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ confirm the occurrence of active biological nitrification within the gravel matrix. However, as effluent nitrate consistently exceeded influent levels by a factor of three to five, the depletion of ammonium primarily reflected internal oxidative transformation rather than the total elimination of nitrogen from the wastewater stream (Tang et al., 2020). Macrophytes played an indispensable role in promoting this conversion: their extensive rhizomes provided a physical attachment surface for nitrifying biofilms, and radial oxygen loss created aerobic microsites within an otherwise anoxic liquid bulk (Kataki et al., 2021; Vymazal et al., 2021). The failure of the systems to achieve complete total nitrogen (TN) elimination highlights that heterotrophic denitrification served as the rate-limiting process across the entire system. Although the influent COD was around 5.8:1 (based on an initial COD:TN ratio of 237.13 ± 23.38 mg/L), rapid organic degradation in the early bed reach likely depleted readily accessible carbon. This deprived denitrifying consortia of essential electron donors in downstream anoxic zones. The superior performance of the mixed-species wetland (54.32% TN removal) suggests complementary spatial effects, whereby the extensive fibrous root system of vetiver, combined with the hollow rhizomatous matrix of common reed, optimises redox zoning and moderates nitrate accumulation (Aalam et al., 2022; Swarnakar et al.,

2022). Nonetheless, methodological caveats must be acknowledged. Firstly, since nominal HRTs were applied in a sequential, descending order (from 5 to 3 days), the operational hydraulic effects remain partially confounded with the continuous maturation of the plant and the accretion of the biofilm (Lam et al., 2024). Secondly, under hot, semi-arid conditions, intense surface evapotranspiration concentrates non-volatile solutes, meaning that concentration-based metrics are likely to underestimate the true mass-based removal efficiencies (Kadlec and Wallace, 2009). In conclusion, although single-stage HSSF-CWs provide robust secondary treatment when operated in hot semi-arid climates, they cannot autonomously accomplish complete nitrogen removal due to redox imbalances and downstream denitrification carbon bottlenecks. To address this, future applications should incorporate artificial intermittent aeration, hybrid wetland configurations (e.g. vertical flow coupled to horizontal flow), external solid-phase carbon supplementation and tracer-verified hydraulic residence time distributions, in order to decouple the biological and hydraulic drivers.

ارزیابی عملکرد و عوامل مؤثر بر حذف ترکیبات نیتروژن در تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی برای تصفیه فاضلاب شهری تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه خشک

رضا حاجی شرفی^۱، علی افروس^۲✉، احسان دریگوند^۳، صائب خوش نواز^۴

۱. گروه مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

۲. گروه مهندسی محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: afrous@iaau.ac.ir

۳،۴. گروه مهندسی علوم آب، مرکز تحقیقات آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد سامانه تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (HSSF-CW) در حذف ترکیبات نیتروژنی از فاضلاب شهری، تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه خشک شهرستان دزفول انجام شد. بدین منظور، چهار واحد پایلوت مجزا و موازی در مقیاس آزمایشی و در فضای باز احداث شد که به ترتیب شامل واحد شاهد بدون گیاه، واحد کشت نی (*Phragmites australis*)، واحد کشت وتیور (*Chrysopogon zizanioides*) و واحد کشت ترکیبی نی و وتیور بودند. عملکرد واحدها در سه زمان ماند هیدرولیکی اسمی ۳، ۴ و ۵ روز از نظر حذف نیتروژن کل (TN)، نیتروژن آمونیایی (NH_4^+-N) و نیترات (NO_3^--N) بررسی شد و آنالیز نمونه ها مطابق روش های استاندارد APHA انجام گرفت. یافته ها نشان داد که در شرایط آزمایش، واحدهای دارای پوشش گیاهی مقادیر عددی بالاتری از حذف نیتروژن کل نسبت به واحد شاهد داشتند. بیشترین حذف نیتروژن کل، معادل ۵۴/۳۲ درصد، در واحد کشت ترکیبی و در زمان ماند اسمی پنج روز مشاهده شد. واحد کشت وتیور نیز با میانگین حذف حدود ۴۹/۷۵ درصد، عملکردی نزدیک به کشت ترکیبی نشان داد و می تواند به عنوان گزینه ای قابل بررسی در مطالعات آبی مورد توجه قرار گیرد. حذف نیتروژن آمونیایی در شرایط آزمایش شده در محدوده ۳۵/۲۵ تا ۵۶/۰۸ درصد قرار داشت. افزایش غلظت نیترات در پساب خروجی واحدها نسبت به ورودی مشاهده شد که با وقوع بخشی از فرایندهای تبدیل نیتروژن، از جمله اکسیداسیون آمونیوم، سازگار است؛ با این حال، مسیرهای اختصاصی تبدیل نیتروژن مستقیماً بررسی نشدند. همچنین، حذف ناقص نیتروژن کل و افزایش نیترات خروجی نشان می دهد که تداوم حذف نیتروژن به شرایط مناسب برای مراحل مختلف تبدیل و نگهداشت نیتروژن وابسته است. در مجموع، سامانه تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی در شرایط گرم و نیمه خشک دزفول توانست بخشی از بار نیتروژنی فاضلاب شهری را کاهش دهد. با توجه به ماهیت توصیفی مطالعه و نبود تکرار مستقل در سطح تیمار، تعیین اثر قطعی زمان ماند اسمی و پوشش گیاهی نیازمند مطالعات آینده با طراحی آزمایشی تکرار شده، ردیابی هیدرولیکی و پایش متغیرهای فرایندی است.

مقدمه

سادگی بهره برداری و ظرفیت مناسب برای حذف طیفی از آلاینده ها مورد توجه ویژه قرار گرفته است. تالاب های مصنوعی (CWS) از طریق هم افزایی پیچیده میان بستر متخلخل، توسعه ریشه ای پوشش گیاهی و زیست لایه های میکروبی، فرآیندهای تبدیل و تثبیت نیتروژن را تسهیل می کنند. با وجود این، راندمان این سامانه ها متأثر از برهم کنش هم زمان متغیرهای هیدرولیکی،

ورود پیوسته ترکیبات نیتروژنی ناشی از تخلیه پساب های شهری به منابع پذیرنده، یکی از چالش های بنیادین در مدیریت کیفی منابع آب به شمار می رود. غلظت های مازاد این ترکیبات می توانند با افزایش خطر اوتریفیکاسیون، ساختار و عملکرد بوم سازگان های آبی را تحت تأثیر قرار دهند. در دهه های اخیر، توسعه سامانه های تصفیه مبتنی بر فرآیندهای طبیعی به دلیل مصرف انرژی نسبتاً پایین،

استناد: حاجی شرفی، ر.، افروس، ع.، دریگوند، ا.، خوش نواز، ص. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد و عوامل مؤثر بر حذف ترکیبات نیتروژن در تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی برای تصفیه فاضلاب شهری تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه خشک. مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰ (۲)، ۱۴۷-۱۲۸.

<https://doi.org/10.22034/jeg.2026.137813.1003>

ویژگی‌های اقلیمی، ترکیب گونه‌ای پوشش گیاهی و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط است (Stefanakis, 2020; Vymazal et al., 2021; Varma et al., 2021).

در تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (HSSF-CWs)، پساب در یک شیب افقی پیوسته درون بستر متخلخل جریان یافته و شرایط کم‌اکسیژن و عمدتاً آنوکسیک در بخش قابل توجهی از بستر ایجاد می‌شود. در این سامانه‌ها، محدودیت اکسیژن محلول می‌تواند ظرفیت نیتریفیکاسیون را نسبت به سامانه‌های جریان عمودی محدود کند؛ با این حال، نیتریفیکاسیون می‌تواند در ریزمحیط‌های هوازی یا اکسیژن‌دار، از جمله نواحی مرتبط با ریزوسفر، رخ دهد (Vymazal and Kröpfelová, 2009).

مقابل، محیط آنوکسیک بخش‌های عمیق‌تر بستر، بستری مناسب برای وقوع دنیتریفیکاسیون هتروتروفیک و تبدیل نترات به گاز نیتروژن فراهم می‌سازد؛ فرآیندی که وابستگی شدیدی به در دسترس بودن کربن آلی زیست‌تخریب‌پذیر دارد (Rahman et al., 2020; Wu et al., 2023).

زمان ماند هیدرولیکی (HRT) به عنوان یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای طراحی و بهره‌برداری، سینتیک واکنش‌های زیستی و مدت‌زمان تماس آلاینده‌ها با بیوفیلم‌های چسبیده به بستر را تعیین می‌کند. اگرچه افزایش زمان ماند اسمی فرصت تماس پساب با سطوح کاتالیزوری بستر را افزایش می‌دهد، اما بهبود کارایی سیستم لزوماً تبعیت خطی از این پارامتر نداشته و به شدت تحت تأثیر توازن اکسیژنی و گرادیان‌های دمایی قرار دارد (Vymazal et al., 2021).

علاوه بر جنبه‌های هیدرولیکی، نقش پوشش گیاهی فراتر از جذب مستقیم عناصر مغذی توسط بافت‌های گیاهی است. پوشش گیاهی می‌تواند از طریق توسعه ریشه، تغییر ویژگی‌های ریزوسفری، فراهم کردن سطوح مناسب برای رشد میکروبی و در برخی گونه‌ها انتقال اکسیژن به ناحیه ریشه، شرایط مناسبی برای مشارکت در تبدیل نیتروژن ایجاد کند. با این حال، سهم نسبی این مسیرها به گونه گیاهی، مرحله رشد، شرایط هیدرولیکی و محیطی وابسته است. در این پژوهش، از گونه نی معمولی (Phragmites australis) به عنوان گیاه بومی و غالب در تالاب‌های مصنوعی (Afrous et al., 2011; Gholipour, 2025) و گونه وتیور

(Chrysopogon zizanioides) با برخورداری از سیستم ریشه‌ای متراکم و عمیق جهت تقابل با شرایط تنش‌زای اقلیم‌های نیمه‌خشک استفاده شده است (Danh et al., 2009; Varma et al., 2021).

در اقلیم گرم دزفول، دمای بالای محیط می‌تواند بر نرخ فرآیندهای زیستی اثرگذار باشد، در حالی که افزایش دما با کاهش حلالیت اکسیژن در آب و افزایش تبخیر-تعرق می‌تواند شرایط هیدرولیکی و اکسیژنی بستر را نیز تغییر دهد (Vymazal et al., 2021).

با وجود مطالعات متعدد درباره حذف نیتروژن در تالاب‌های مصنوعی، بخش قابل‌توجهی از شواهد موجود مربوط به شرایط اقلیمی معتدل، سامانه‌های مقیاس آزمایشگاهی یا پیکربندی‌های متفاوت جریان است (Gholipour, 2025). همچنین، شواهد مقایسه‌ای درباره عملکرد نی معمولی، وتیور و کشت ترکیبی این دو گونه در تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی پایلوت تحت شرایط گرم و نیمه‌خشک، به‌ویژه در ارتباط با تغییر زمان ماند، همچنان محدود است. از سوی دیگر، تغییرات هم‌زمان نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاکی و نترات می‌تواند برای توصیف پاسخ سامانه به شرایط هیدرولیکی و پوشش گیاهی مفید باشد، اما این روابط باید با توجه به محدودیت‌های طراحی و بدون نسبت‌دادن مستقیم تغییرات غلظت به یک مسیر زیست‌شیمیایی منفرد تفسیر شوند.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی در حذف ترکیبات نیتروژنی تحت سه رژیم هیدرولیکی اسمی (۳، ۴ و ۵ روز) و چهار سطح پوشش گیاهی (تک‌کشت نی، تک‌کشت وتیور، کشت ترکیبی و شاهد بدون گیاه) در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و گرم دزفول است. بر این اساس، این پژوهش با تمرکز بر تغییرات توصیفی نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاکی و نترات، الگوی عملکرد چهار وضعیت پوشش گیاهی را در زمان‌های ماند اسمی ۳، ۴ و ۵ روز مقایسه می‌کند و تغییرات مشاهده‌شده را در چارچوب شرایط اقلیمی گرم و نیمه‌خشک دزفول تفسیر می‌نماید.

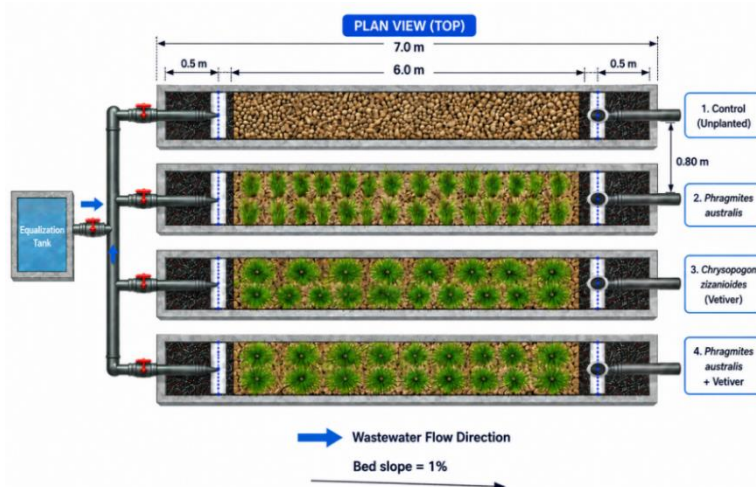
مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی عملکرد حذف ترکیبات نیتروژن در شرایط مختلف زمان ماند و پوشش گیاهی در تالاب مصنوعی با

نامطلوب مانند اتصال کوتاه جریان (Short-circuiting) ممانعت به عمل آید (Kadlec and Wallace, 2009; Vymazal et al., 2021). پساب مورد نیاز مستقیماً از خروجی واحد دانه‌گیر تصفیه‌خانه دزفول تأمین و وارد یک مخزن متعادل‌ساز (Equalization tank) مشترک گردید تا از تأثیر نوسانات کیفی کوتاه‌مدت بر مقایسه تیمارها جلوگیری شود (Vymazal, 2022). ابعاد فیزیکی هر واحد شامل طول کل ۷ متر، عرض ۰/۸۰ متر، عمق ۰/۶۰ متر و شیب طولی بستر ۱ درصد بود. از طول کل، ۶ متر به طول فعال بستر تصفیه و دو بخش ۰/۵۰ متری در ابتدا و انتها به زون‌های توزیع و جمع‌آوری جریان اختصاص یافت (شکل ۱). عمق مؤثر محیط متخلخل ۰/۵۵ متر تثبیت شد (Baskar et al., 2014; Vymazal, 2022). دیواره‌ها و کف واحدها توسط ورق ژئوممبران پلی‌اتیلنی به ضخامت ۱ میلی‌متر عایق‌بندی گردید. توزیع ورودی از طریق لوله‌های مشبک عرضی صورت پذیرفت (UN-Habitat, 2008) و در زون‌های ورودی و خروجی از مصالح سنگی درشت‌دانه برای افت فشار موضعی کم و هدایت یکنواخت استفاده شد. تراز سطح آب زیرسطحی توسط لوله قائم قابل تنظیم (Standpipe) در حدود ۵ سانتی‌متری پایین‌تر از سطح فوقانی بستر حفظ شد (Kadlec and Wallace, 2009; Vymazal, 2022).

جریان زیرسطحی افقی در تصفیه فاضلاب شهری و تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه‌خشک انجام شد. شهرستان دزفول، واقع در شمال استان خوزستان، به دلیل برخورداری از اقلیم مذکور به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. آزمایش‌ها در فضای باز و تحت شرایط طبیعی منطقه اجرا شدند؛ بنابراین سامانه بدون کنترل مصنوعی دما، تابش خورشیدی و رطوبت، در معرض شرایط واقعی اقلیمی قرار داشت. این موضوع امکان ارزیابی عملکرد تالاب را در شرایطی کاملاً مشابه با مناطق گرم و نیمه‌خشک جنوب و جنوب‌غرب ایران فراهم ساخت. براساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر (Köppen-Geiger) این منطقه دارای اقلیم گرم و نیمه‌خشک (BSH) است. میانگین دمای سالانه این منطقه حدود ۲۴/۴ درجه سانتی‌گراد، حداکثر دمای تابستان بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (Beck et al., 2018; Fick and Hijmans, 2017; Khuzestan Province Meteorological Department, 2024).

این مطالعه در چهار واحد مجزی و موازی با چهار وضعیت پوشش گیاهی و سه مرحله متوالی زمان ماند اسمی انجام شد. طراحی فیزیکی بر پایه راهنمایی مراجع مهندسی انجام گرفت تا توزیع متقارن جریان برقرار شده و سعی بر آن شد که از بروز پدیده‌های



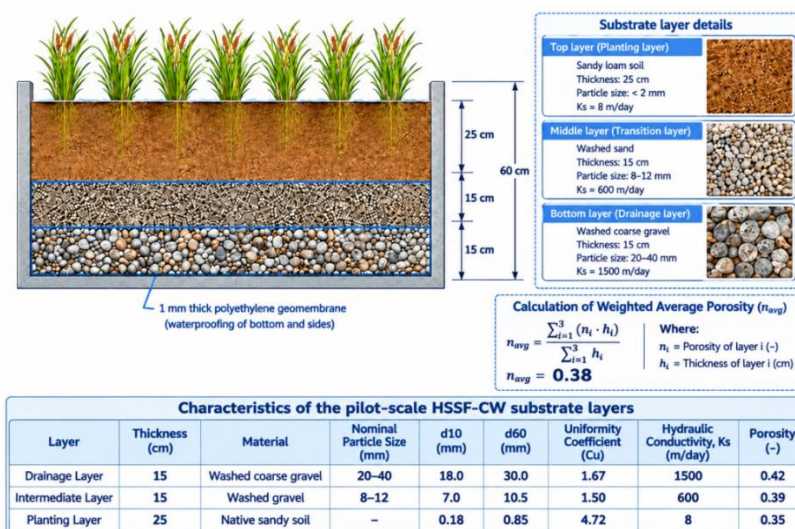
شکل ۱. جزئیات اجرایی تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (HSSF-CW) و آرایش حوضچه‌های آزمایشگاهی (تولیدشده با استفاده از مدل

OpenAI DALL-E 3, 2024)

Fig. 1. Design Specifications of the Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland (HSSF-CW) Experimental Setup (Image generated using OpenAI DALL-E 3, 2024)

لایه میانی انتقالی: به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از گراول متوسط (قطر اسمی ۸ تا ۱۲ میلی‌متر) با K_s معادل ۶۰۰ متر بر روز برای حفظ پیوستگی خطوط جریان و تثبیت لایه بالایی.

لایه کاشت فوقانی: به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر از بافت خاک بومی ماسه‌ای-لومی (Sandy loam) با K_s معادل ۸ متر بر روز جهت توسعه ریزوسفر ریشه و تثبیت بیوفیلیم (U.S. Environmental Protection Agency, 2000; UN-Habitat, 2008).



شکل ۲. جزئیات ساختار لایه‌های بستر تالاب مصنوعی جریان زیرسطحی افقی و مشخصات فیزیکی مصالح (تولیدشده با استفاده از مدل OpenAI DALL-E 3, 2024)

Fig. 2. Schematic representation of HSSF, physical characteristics of filter media (Image generated using OpenAI DALL-E 3, 2024)

زیست‌لایه طراحی شد (Vymazal, 2022; Swarnakar et al., 2022).

$$V_{eff} = L_{active} \times W \times deff \times n \quad (1)$$

با توجه به اندازه مؤثر ذرات در لایه کاشت، وضعیت سطح آب و نشانه‌های گرفتگی در طول بهره‌برداری پایش شد. در طول دوره آزمایش، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در دبی خروجی یا افزایش غیرعادی تراز آب مشاهده نشد.

این مطالعه در چهار واحد پایلوت موازی با چهار وضعیت پوشش گیاهی و سه مرحله متوالی HRT اسمی انجام شد. متغیرهای عملیاتی مورد بررسی شامل وضعیت پوشش گیاهی در چهار واحد

بستر فیلتر به‌صورت سه‌لایه با ضخامت کل ۵۵/۰ متر چیدمان یافت (شکل ۲):

لایه زهکش تحتانی: به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از شن درشت شسته شده (قطر اسمی ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر) با هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) برابر با ۱۵۰۰ متر بر روز، جهت تخلیه ثقیلی و ممانعت از ایجاد ماندابی موضعی.

اندازه ذرات مصالح بر اساس استاندارد ASTM D6913 تعیین شد و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از آزمون هد ثابت (Constant Head Permeability Test) اندازه‌گیری شد. همچنین، شاخص‌های دانه‌بندی شامل d_{10} ، d_{60} و ضریب یکنواختی (Cu) برای تمامی لایه‌ها محاسبه شد (شکل ۲). این شاخص‌ها برای توصیف ویژگی‌های هیدرولیکی و دانه‌بندی بستر محاسبه شدند. میانگین تخلخل کل بستر با در نظر گرفتن ضخامت لایه‌ها حدود ۰/۳۸ برآورد شد. براین‌اساس، حجم مؤثر هیدرولیکی هر واحد با استفاده از ابعاد مؤثر بستر و تخلخل آن، حدود یک مترمکعب محاسبه شد (رابطه ۱). این لایه‌بندی با هدف فراهم کردن محیط متخلخل مناسب برای جریان زیرسطحی و استقرار

متغیرهای هیدرولیکی سامانه بر مبنای روابط (۲) تا (۴) تعیین گردیدند (Vymazal, 2022):

$$\text{nominal HRT} = \frac{V_e}{Q} \quad (2)$$

$$\text{HLR} = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

$$\text{OLR} = \frac{Q \times \text{CBOD}_5}{A} \quad (4)$$

که در آن‌ها Q دبی ورودی ($\text{m}^3 \text{day}^{-1}$)، A سطح مؤثر افقی بستر (4.80 m^2) و CBOD_5 میانگین غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی ورودی (g m^{-3}) است (جدول ۱).
شایان ذکر است که پارامتر nominal HRT صرفاً معرف زمان ماند محاسباتی (تئوریک) بوده و تحلیل جزئی‌تر رفتار هیدرودینامیکی واقعی سیستم در بخش بحث ارائه شده است.

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی و بارگذاری اعمال شده در زمان‌های ماند هیدرولیکی مختلف

Table 1. Hydraulic operating conditions and applied loading rates at different hydraulic retention times (HRTs)

OLR	HLR	Flow rate, Q	V_e	HRT
($\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	(m day^{-1})	($\text{m}^3 \text{day}^{-1}$)	(m^3)	(day)
7.01	0.069	0.333	1.00	3
5.26	0.052	0.250	1.00	4
4.21	0.042	0.200	1.00	5

گرفت؛ با این وجود، به دلیل پیوستگی زمانی آزمایش، مقایسه بین سطوح مختلف زمان ماند اسمی تحت تأثیر عوامل هم‌بسته زمانی نظیر تکامل ریشه و بلوغ بیوفیلم قرار دارد. همچنین، در آغاز هر مرحله، یک دوره تطبیق ۷ روزه اعمال شد که به لحاظ محاسباتی معادل $1/4$ تا $2/33$ برابر حجم مؤثر محاسباتی بستر است؛ با این حال، به سبب عدم اندازه‌گیری تجربی منحنی توزیع زمان ماند (RTD)، این شاخص‌ها صرفاً بیانی تئوریک از تعویض آب منفذی بوده و دلالت قطعی بر برقراری کامل حالت پایدار هیدرولیکی یا سینتیکی ندارند (Kadlec and Wallace, 2009; Vymazal et al, 2021). نمونه‌های ورودی از نقطه مشترک توزیع پس از مخزن متعادل‌ساز برداشت شدند و به‌عنوان مرجع مشترک برای چهار واحد در همان زمان نمونه‌برداری استفاده شدند.

شامل کشت نی معمولی، کشت وتیور، کشت ترکیبی و شاهد فاقد پوشش گیاهی (Unvegetated control) و متغیر زمان ماند اسمی در سه سطح ۳، ۴ و ۵ روز بود. مواد گیاهی مورد استفاده شامل بوته‌های جوان و قلمه‌های سالم جمع‌آوری شده از حاشیه رودخانه دز و کانال‌های زهکش مناطق پیرامون شهرستان دزفول بودند. پیش از کاشت، گیاهان از نظر یکنواختی ظاهری و سلامت انتخاب شدند تا تفاوت‌های اولیه رشد بین تیمارها به حداقل برسد. کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر در عرض و ۲۰ سانتی‌متر در طول انجام شد که معادل تراکم ۲۵ بوته در مترمربع بود. در تیمار ترکیبی، تراکم کل نیز ۲۵ بوته در مترمربع بود و هر گونه گیاهی تقریباً نیمی از تراکم کل را تشکیل می‌داد.

به‌منظور تأمین شرایط هیدرولیکی یکنواخت، دبی ورودی هر واحد به‌صورت مستقل توسط شیر تویی PVC تنظیم شد و در طول دوره بهره‌برداری، به طور منظم با استفاده از روش حجمی - زمانی (Volumetric Method) کنترل و در صورت نیاز اصلاح گردید تا دبی طراحی در تمامی واحدها حفظ شود.

پس از کاشت، یک دوره تطابق زیستی ۳۰ روزه با اعمال تدریجی پساب رقیق‌شده (افزایش غلظت از ۲۵٪ به ۱۰۰٪) جهت استقرار بیوفیلم و سازگاری گیاهان سپری شد (UN-Habitat, 2008). رژیم‌های HRT به صورت نزولی (از ۵ به ۳ روز) اعمال گردیدند. (جدول ۲) در هر فاز هیدرولیکی، پس از سپری شدن دوره تثبیت ۷ روزه، نمونه‌برداری‌های لحظه‌ای (Grab Sampling) (دو نوبت در روز طی ۵ روز متوالی) صورت گرفت (APHA, 2023).

اعمال توالی نزولی زمان ماند هیدرولیکی اسمی در هر چهار بستر آزمایشی به‌منظور افزایش تدریجی بارگذاری، پیشگیری از وارد آمدن شوک هیدرولیکی-آلی به جامعه میکروبی بستر و فراهم‌سازی شرایط محیطی یکنواخت جهت مقایسه موازی تیمارها صورت

جدول ۲. جدول برنامه اجرای مراحل آزمایش و نمونه برداری بر اساس HRT

Table 2. Sampling design for each hydraulic retention time (HRT)

Value	Parameter
3, 4, and 5	Hydraulic Retention Times (HRTs) (days)
7 days	Stabilization Period After Each HRT Adjustment
5 days	Sampling Duration at Each HRT
Twice daily (morning and evening)	Sampling Frequency
Grab sampling	Sampling Method
Common influent distribution point	Influent Sampling Point
Four parallel HSSF-CW units, one unit per vegetation treatment experimental units	Effluent Sampling Points
10	Temporal observations per unit at each HRT
Day × AM/PM × HRT = 5×2×3=30	Total Influent Samples
Day × AM/PM × HRT × treatment = 5×2×3×4=120	Total Effluent Samples

اکسیژنی و دسترسی به کربن در فرایندهای تبدیل نیتروژن در تالاب‌های زیرسطحی انجام شد (Saeed and Sun, 2012).

آنالیزهای آزمایشگاهی بر اساس روش‌های استاندارد انجمن

بهداشت عمومی آمریکا انجام شد (جدول ۳). (APHA, 2023)

برای اندازه‌گیری COD از روش SM5220 استفاده شد. پارامترهای نیتروژنی نیز مطابق روش‌های استاندارد آزمایشگاهی مربوطه اندازه‌گیری شدند و غلظت‌ها بر حسب میلی گرم در لیتر گزارش شد. برای همه نمونه‌ها، شرایط نگهداری و انتقال یکسان بود تا تغییرات پس از نمونه‌برداری به حداقل برسد.

کلیه روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر اساس استانداردهای معتبر APHA انجام گرفت (جدول ۳) (Saeed and Sun, 2012; APHA, 2023).

با توجه به هدف این مطالعه، شاخص‌های اصلی نیتروژن شامل نیتروژن کل، نیتروژن آمونیومی و نترات بودند. علاوه بر این، دما، اکسیژن محلول (DO)، pH و هدایت الکتریکی (EC) برای توصیف شرایط محیطی و شیمیایی سامانه اندازه‌گیری شدند. COD نیز به‌عنوان شاخصی از بار آلی موجود و منبع بالقوه کربن برای فرایندهای زیستی مرتبط با حذف نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب این متغیرها با توجه به نقش ترکیبات نیتروژن، شرایط

جدول ۳. روش‌های استاندارد آنالیز آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای کیفی فاضلاب (بر اساس APHA, 2023)

Table 3. Analytical and standard methods employed for the determination of wastewater quality parameters (based on APHA, 2023)

Parameter	Symbol	Analytical Method	Standard Method (APHA)
Total nitrogen	TN	Alkaline persulfate digestion / UV-Vis spectrophotometry	4500-N C
Ammonium nitrogen	NH ₄ ⁺ -N	Phenate method / spectrophotometry	4500-NH ₃ F
Nitrate nitrogen	NO ₃ ⁻ -N	Ultraviolet spectrophotometric screening method	4500-NO ₃
Chemical oxygen demand	COD	Closed reflux, colorimetric method	5220 D
Dissolved oxygen	DO	Membrane electrode / electrometric method	4500-O ⁻ G
Hydrogen ion index	pH	Electrometric method (glass electrode)	4500-H ⁻ B
Electrical conductivity	EC	Conductivity cell (Wheatstone bridge principle)	2510 B

راندمان حذف برای TN و NH₄⁺-N از اختلاف غلظت ورودی و خروجی (رابطه ۵) محاسبه شد:

$$\text{Removal Efficiency}(\%) = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (5)$$

تحلیل داده‌های حاصل از پایش متغیرها در گام نخست در قالب آمار توصیفی سامان‌دهی شد؛ به‌طوری‌که مقادیر به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار ($Mean \pm SD$)، دامنه تغییرات (حداقل و حداکثر) و نمودارهای سری زمانی برای بازنمایی روند تغییرات کیفیت پساب گزارش گردیدند. در این پژوهش، انحراف معیار ارائه‌شده صرفاً بازتاب‌دهنده گستره پراکندگی و نوسانات ذاتی نمونه‌های متوالی در طول دوره پایش پیوسته درون هر ستون آزمایشی (واحد پایلوت) است. به‌منظور مقایسه میزان نوسان‌پذیری داده‌های متغیرهای مختلف، ضریب تغییرات (CV) بر پایه رابطه (۷) زیر محاسبه شد:

$$CV = \left(\frac{SD}{Mean} \right) \times 100 \quad (7)$$

لازم به تصریح است در این مطالعه، CV به‌عنوان شاخصی از پراکندگی نسبی مشاهدات زمانی در هر واحد استفاده شد؛ بنابراین، نباید آن را به‌عنوان عدم قطعیت آماری برخاسته از تکرارهای مستقل تجربی (True Independent Replicates) یا خطای استاندارد ناشی از طراحی بلوکی تعبیر نمود.

نتایج

بررسی کیفیت فاضلاب ورودی نشان داد که غلظت ترکیبات نیتروژن در طول دوره آزمایش از ثبات نسبی برخوردار بود. میانگین غلظت نیتروژن کل (TN) در ۳۰ نمونه ورودی برابر با $1/67 \pm$ و $41/14$ میلی‌گرم در لیتر بود، در حالی که میانگین NH_4^+-N و NO_3^--N به‌ترتیب $1/77 \pm$ و $30/46 \pm$ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شد (جدول ۴). بنابراین، بخش عمده TN ورودی از نیتروژن آمونیومی تشکیل شده بود و NH_4^+-N تقریباً سه‌چهارم نیتروژن کل ورودی را به خود اختصاص داد. این ویژگی، فاضلاب ورودی را از نظر ترکیب نیتروژن، عمدتاً آمونیومی نشان می‌دهد و مبنای مناسبی برای بررسی تغییرات NH_4^+-N و NO_3^--N در طول فرایند تصفیه فراهم می‌کند.

میانگین دمای فاضلاب ورودی $2/06 \pm 33/56$ درجه سانتی‌گراد بود و اکسیژن محلول، pH و هدایت الکتریکی به‌ترتیب در محدوده‌های نسبتاً پایدار قرار داشتند. میانگین DO ورودی حدود $0/90$ میلی‌گرم در لیتر و میانگین pH برابر با $7/06$ بود. این شرایط نشان می‌دهد که فاضلاب ورودی از نظر pH نزدیک به محدوده خنثی و از نظر اکسیژن محلول در وضعیت نسبتاً کم‌اکسیژن وارد

که در آن (Ci) غلظت پارامتر در فاضلاب ورودی و (Co) غلظت متناظر در فاضلاب خروجی است. بنابراین، راندمان‌های گزارش‌شده در این پژوهش بیانگر حذف مبتنی بر غلظت (concentration-based removal efficiency) هستند و بر اساس بار جرمی ورودی و خروجی محاسبه نشده‌اند. این شاخص به‌طور گسترده برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های تصفیه، از جمله تالاب‌های مصنوعی در حذف آلاینده‌های آلی، جامدات معلق و شاخص‌های میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Vymazal, 2007; Saeed and Sun, 2012).

با توجه به اینکه مقدار NO_3^--N در برخی تیمارها نسبت به غلظت ورودی افزایش یافت، برای این پارامتر به‌جای تعریف آن به‌عنوان راندمان حذف، تغییر غلظت در سامانه گزارش شد. به این ترتیب، افزایش NO_3^--N به‌عنوان بخشی از الگوی تغییر شکل نیتروژن تفسیر شد و از تبدیل افزایش نترات به (حذف منفی) به‌عنوان شاخص اصلی جلوگیری شد. تغییر غلظت NO_3^--N از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$\Delta NO_3 - N = Co - Ci \quad (6)$$

که در آن مقدار مثبت نشان‌دهنده افزایش غلظت NO_3^--N در خروجی نسبت به ورودی است.

پس از ثبت، کنترل کیفی و سازمان‌دهی داده‌ها محاسبات توصیفی، تعیین CV و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار R نسخه ۴/۳ انجام شد (R Core Team, 2023). مطالعه حاضر یک پایلوت توصیفی-اکتشافی با چهار واحد آزمایشی مجزا و موازی بود که در آن هر تیمار پوشش گیاهی (شاهد بدون گیاه، Phragmites australis، Chrysopogon zizanioides و کشت مخلوط) در یک واحد آزمایشی اعمال شد. از این‌رو، برای عامل پوشش گیاهی تکرار حقیقی وجود ندارد ($n = 1$) و برآورد خطای آزمایشی بین‌واحدی ممکن نیست. در هر سطح زمان ماند هیدرولیکی، نمونه‌برداری طی پنج روز متوالی و در دو نوبت صبح و عصر انجام گرفت؛ این مشاهدات به‌عنوان تکرار اندازه‌گیری در طول زمان برای توصیف تغییرپذیری زمانی کوتاه‌مدت عملکرد هر واحد به کار رفتند و به‌هیچ‌وجه به‌عنوان تکرار آزمایشی مستقل تلقی نشدند (Zuur et al., 2010; Hurlbert, 1984).

سامانه شده است. پایداری نسبی ترکیب نیتروژن ورودی در سه زمان ماند اسمی، امکان مقایسه عملکرد واحدها را بدون تأثیر شدید نوسانات بار نیتروژنی ورودی فراهم کرد.

نسبت $BOD_5/COD=0.43$ نشان دهنده فاضلاب با زیست تخریب پذیری متوسط است که برای فرایندهای تصفیه

جدول ۴. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی فاضلاب شهری ورودی

Table 4. Physicochemical characteristics of the influent municipal wastewater

Unit	CV (%)	Min-Max	SD ± Mean	Parameter
mg/L	4.06	37.60-43.40	41.14±1.67	TN
mg/L	5.81	27.40-33.80	30.46±1.77	NH ₄ -N
mg/L	9.07	0.87-1.19	1.03±0.09	NO ₃ ⁻ -N
mg/L	9.86	193-294	237.13±23.38	COD
mg/L	6.96	112-144	128.53± 8.94	TSS
mg/L	19.55	0.62-1.16	0.90±0.17	DO
—	2.72	6.81-7.35	7.06± 0.19	pH
°C	6.13	29.7-37.6	33.56± 2.06	Temperature
µS/cm	3.43	969-1104	1046.37±35.87	EC

میزان CV نیتروژن کل ورودی در بازه ۳/۵۸ تا ۵/۱۶ درصد قرار دارد که نشان دهنده یکنواختی بالا و پایداری مناسب بارگذاری هیدرولیکی-شیمیایی در طول دوره نمونه برداری پایلوت است. در مجموع، ثبات نسبی غلظت TN، NH₄⁺-N و NO₃⁻-N در فاضلاب ورودی، شرایط مناسبی برای مقایسه عملکرد تیمارهای مختلف تحت زمان های ماند اسمی مورد بررسی فراهم کرد (شکل ۳).

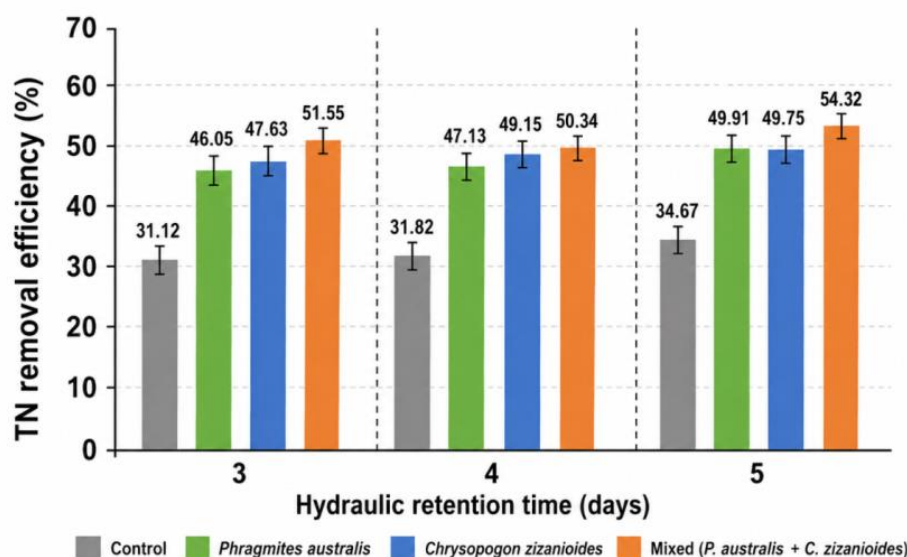
راندمان حذف TN در هر چهار تیمار گیاهی با افزایش HRT و حضور پوشش گیاهی تغییر کرد. در تیمار شاهد، میانگین راندمان حذف از ۳۱/۱۲ درصد در HRT=3 روز به ۳۱/۸۲ درصد در HRT=4 روز و ۳۴/۶۷ درصد در HRT=5 روز افزایش یافت. در تیمار *Phragmites australis*، راندمان حذف به ترتیب ۴۶/۰۵،

۴۷/۱۳ و ۴۹/۹۱ درصد بود. برای *Chrysopogon zizanioides*، مقادیر متناظر ۴۷/۶۳، ۴۹/۱۵ و ۴۹/۷۵ درصد به دست آمد. بیشترین مقادیر در تیمار کشت ترکیبی مشاهده شد؛ به طوری که راندمان حذف TN از ۵۱/۵۵ درصد در HRT=3 روز به ۵۰/۳۴ درصد در HRT=4 روز و ۵۴/۳۲ درصد در HRT=5 روز رسید. کمترین ضریب تغییرات (CV) نیتروژن خروجی مربوط به تیمار کشت ترکیبی (Mixed) در HRT=5 با مقدار ۳/۶۹ درصد است، در حالی که بیشترین نوسان در تیمار شاهد (Control) در HRT=3 با ۹/۴۶ درصد مشاهده می شود (جدول ۵).

جدول ۵. غلظت TN و راندمان حذف آن تحت تأثیر انواع پوشش گیاهی و زمان های ماند هیدرولیکی مختلف

Table 5. TN concentration and removal efficiency under different vegetation types and hydraulic retention times

Vegetation type	HRT (d)	Influent TN (mg/L)	Effluent TN (mg/L)	TN removal efficiency (%)
Control	3	41.30 ± 1.48	28.43 ± 2.69	31.12 ± 6.49
Control	4	41.04 ± 1.50	27.94 ± 2.22	31.82 ± 6.11
Control	5	41.07 ± 2.12	26.79 ± 1.91	34.67 ± 5.06
P. australis	3	41.30 ± 1.48	22.26 ± 1.21	46.05 ± 3.50
P. australis	4	41.04 ± 1.50	21.68 ± 0.91	47.13 ± 2.60
P. australis	5	41.07 ± 2.12	20.53 ± 0.98	49.91 ± 3.19
C. zizanioides	3	41.30 ± 1.48	21.62 ± 1.06	47.63 ± 2.61
C. zizanioides	4	41.04 ± 1.50	20.85 ± 1.08	49.15 ± 2.80
C. zizanioides	5	41.07 ± 2.12	20.57 ± 0.93	49.75 ± 3.98
Mixed (P. + C.)	3	41.30 ± 1.48	19.97 ± 0.86	51.55 ± 3.31
Mixed (P. + C.)	4	41.04 ± 1.50	20.36 ± 0.82	50.34 ± 2.59
Mixed (P. + C.)	5	41.07 ± 2.12	18.70 ± 0.69	54.32 ± 3.52



شکل ۳. راندمان حذف نیتروژن کل تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و زمان ماند هیدرولیکی

Fig. 3. TN removal efficiency under different vegetation types and hydraulic retention times

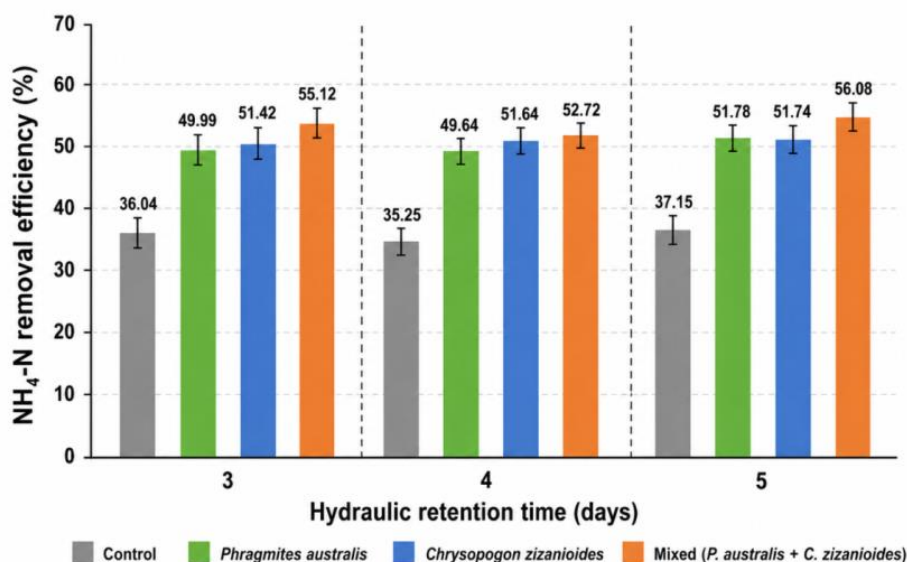
الگوی حذف $\text{NH}_4^+\text{-N}$ مشابه TN بود، با این تفاوت که اثر HRT بر این شاخص به میزان مشهود نبود (جدول ۶). در تیمار شاهد، راندمان حذف $\text{NH}_4^+\text{-N}$ در HRT های ۳، ۴ و ۵ روز به ترتیب ۳۶/۰۴، ۳۵/۲۵ و ۳۷/۱۵ درصد بود (شکل ۴). در *Phragmites australis*، راندمان حذف از ۴۹/۹۹ درصد در HRT=3 روز به ۵۱/۷۸ درصد در HRT=5 روز رسید. در تیمار وتیور، مقادیر حذف به ترتیب ۵۱/۴۲، ۵۱/۶۴ و ۵۱/۷۴ درصد بود. بیشترین حذف $\text{NH}_4^+\text{-N}$ در تیمار کشت ترکیبی ثبت شد و از ۵۵/۱۲ درصد در HRT=3 روز به ۵۶/۰۸ درصد در HRT=5 روز رسید. در تمامی

پارامترها، سلول‌های گیاه‌دار نسبت به شاهد، ضرایب تغییرات به مراتب کمتری را نشان می‌دهند. بیشترین نوسان در کارایی حذف آمونیوم مربوط به شاهد در HRT=3 با ۲۰/۹۸ درصد است، در حالی که در سیستم‌های گیاهی این نوسان به ۵/۳۷ تا ۸/۱۸ درصد محدود شده است. کمترین مقادیر CV برای غلظت خروجی آمونیوم ۳/۶۷ درصد و نترات خروجی ۳/۶۶ درصد متعلق به تیمار ترکیبی (*Phragmites* + *Vetiver*) در زمان ماند ۵ روز مشاهده گردید (جدول ۶).

جدول ۶. حذف $\text{NH}_4^+\text{-N}$ و تغییرات $\text{NO}_3^-\text{-N}$ تحت تأثیر انواع پوشش گیاهی و زمان‌های ماند هیدرولیکی مختلف

Table 6. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ change under vegetation type and hydraulic retention time

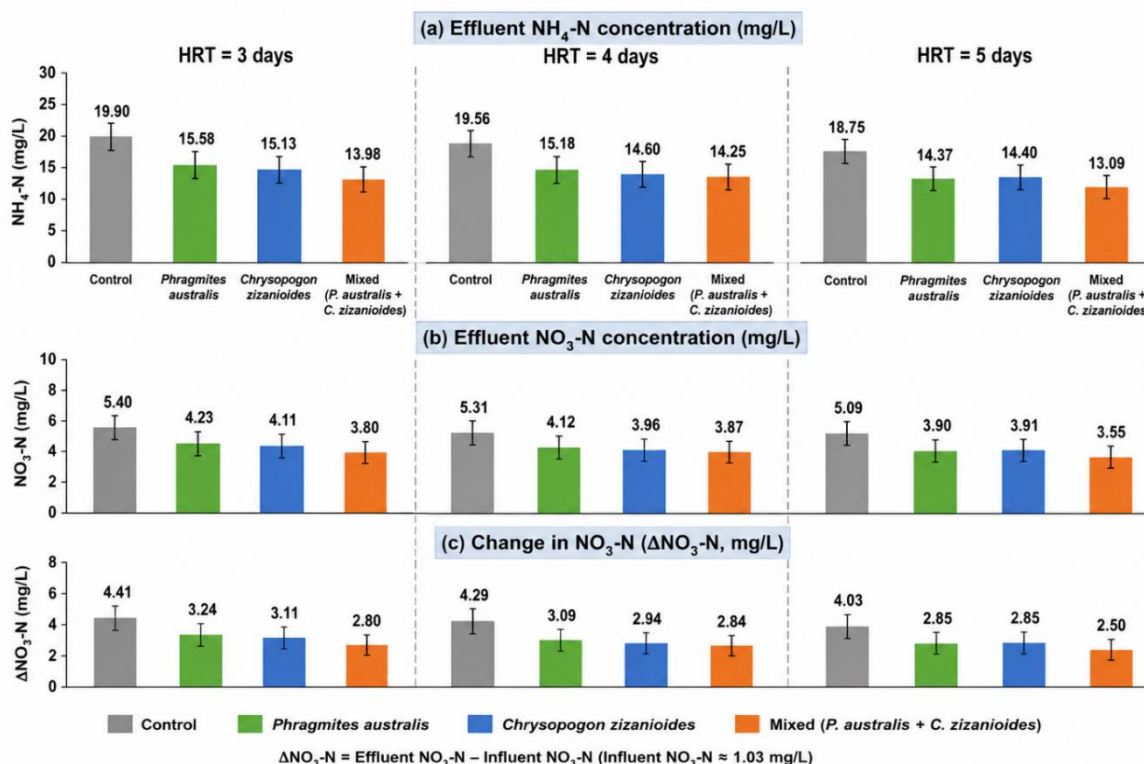
Vegetation	HRT (d)	Effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal (%)	Effluent $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	$\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)
Control	3	19.90 ± 1.89	36.04 ± 7.56	5.40 ± 0.51	+4.41 ± 0.53
Control	4	19.56 ± 1.55	35.25 ± 4.85	5.31 ± 0.42	+4.29 ± 0.44
Control	5	18.75 ± 1.34	37.15 ± 5.55	5.09 ± 0.36	+4.03 ± 0.38
<i>P. australis</i>	3	15.58 ± 0.85	49.99 ± 3.67	4.23 ± 0.23	+3.24 ± 0.26
<i>P. australis</i>	4	15.18 ± 0.64	49.64 ± 4.06	4.12 ± 0.17	+3.09 ± 0.20
<i>P. australis</i>	5	14.37 ± 0.69	51.78 ± 4.21	3.90 ± 0.19	+2.85 ± 0.18
<i>C. zizanioides</i>	3	15.13 ± 0.75	51.42 ± 3.56	4.11 ± 0.20	+3.11 ± 0.28
<i>C. zizanioides</i>	4	14.60 ± 0.76	51.64 ± 2.81	3.96 ± 0.21	+2.94 ± 0.27
<i>C. zizanioides</i>	5	14.40 ± 0.65	51.74 ± 3.35	3.91 ± 0.18	+2.85 ± 0.24
Mixed	3	13.98 ± 0.61	55.12 ± 2.96	3.80 ± 0.16	+2.80 ± 0.16
Mixed	4	14.25 ± 0.57	52.72 ± 3.55	3.87 ± 0.16	+2.84 ± 0.20
Mixed	5	13.09 ± 0.48	56.08 ± 3.55	3.55 ± 0.13	+2.50 ± 0.16



شکل ۴. راندمان حذف نیتروژن آمونیومی تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و زمان ماند هیدرولیکی
 Fig. 4. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency under different vegetation types and hydraulic retention times

ترکیبی کمترین افزایش را داشت. در $\text{HRT}=3$ روز، افزایش میانگین $\text{NO}_3^-\text{-N}$ در شاهد حدود $4/41$ میلی گرم در لیتر بود، در حالی که این مقدار در *Phragmites*، وتیور و کشت ترکیبی به ترتیب حدود $3/24$ ، $3/11$ و $2/80$ میلی گرم در لیتر بود. در $\text{HRT}=5$ روز، افزایش متناظر به ترتیب حدود $4/03$ ، $2/84$ ، $2/85$ و $2/50$ میلی گرم در لیتر بود. نکته قابل توجه آن است که تیمارهای دارای پوشش گیاهی، به ویژه کشت ترکیبی، علاوه بر حذف بیشتر $\text{NH}_4^+\text{-N}$ و TN ، افزایش کمتری در $\text{NO}_3^-\text{-N}$ نشان دادند.

به طور کلی، حضور پوشش گیاهی موجب افزایش محسوسی در حذف $\text{NH}_4^+\text{-N}$ نسبت به شاهد شد، در حالی که افزایش HRT از ۳ به ۵ روز تغییر نسبتاً محدودی در این شاخص ایجاد کرد. بر خلاف TN و $\text{NH}_4^+\text{-N}$ مقدار غلظت $\text{NO}_3^-\text{-N}$ در خروجی همه تیمارها بیشتر از مقدار ورودی بود. میانگین غلظت $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ورودی حدود $1/03$ میلی گرم در لیتر بود، در حالی که غلظت خروجی در تیمارهای مختلف تقریباً در محدوده $3/5$ تا $5/4$ میلی گرم در لیتر قرار گرفت (شکل ۵). شدت افزایش $\text{NO}_3^-\text{-N}$ به نوع پوشش گیاهی و HRT وابسته بود. تیمار شاهد بیشترین افزایش نترات را نشان داد، در حالی که کشت



شکل ۵. غلظت $\text{NH}_4^+\text{-N}$ و $\text{NO}_3^-\text{-N}$ خروجی و تغییرات $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}$ در زمان‌های ماند هیدرولیکی مختلف

Fig. 5. Effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations and $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}$ at different hydraulic retention times

ویژگی‌های کیفی ورودی بیانگر آن است که پاسخ سیستم تصفیه

باید هم‌زمان از دو منظر حذف نیتروژن (Nitrogen removal) و

تبدیل نیتروژن (Nitrogen transformation) مورد تفسیر قرار

گیرد. به‌طور مشخص، کاهش غلظت $\text{NH}_4^+\text{-N}$ توأم با افزایش

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ، لزوماً به‌معنای حذف خالص معادل نیتروژن از سیستم

نیست؛ چراکه ممکن است آمونیوم طی فرآیند نیتریفیکاسیون به

نیترات اکسید شده باشد، بدون آنکه نیتروژن در ادامه از فاز آبی

خارج گردد. بر همین اساس، پارامتر نیتروژن کل (TN) شاخص

مناسب‌تری جهت ارزیابی کاهش خالص نیتروژن در فاز آبی به‌شمار

می‌رود، درحالی‌که سنجش هم‌زمان $\text{NH}_4^+\text{-N}$ و $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ،

اطلاعات ارزشمندی را پیرامون جهت و سازوکار دگرگونی‌های

بیوشیمیایی درون بستر فراهم می‌سازد (Tang et al., 2020).

در شرایط مختلف عملیاتی، راندمان حذف نیتروژن کل در بازه

۳۱/۱۲ تا ۵۴/۳۲ درصد متغیر بود. در واحد شاهد (بدون پوشش

گیاهی)، راندمان حذف TN از ۳۱/۱۲ درصد در زمان ماند

هیدرولیکی اسمی (HRT) برابر ۳ روز، به ۳۴/۶۷ درصد در زمان

بحث و تحلیل نتایج

فاضلاب ورودی دارای میانگین غلظت نیتروژن کل (TN) معادل

$41/14 \pm 1/67$ میلی‌گرم در لیتر بود که از این مقدار، نیتروژن

آمونیمی $\text{NH}_4^+\text{-N}$ حدود ۷۴ درصد و نیتروژن نیتراتی $\text{NO}_3^-\text{-N}$

تنها حدود ۲/۵ درصد را تشکیل می‌داد. این پروفایل کیفی نشان

می‌دهد که آمونیوم، فرم غالب نیتروژن معدنی ورودی به وتلندهای

زیرسطحی افقی (CWS-HSSF) بوده است. همچنین پایداری

نسبی غلظت‌های TN و $\text{NH}_4^+\text{-N}$ در طول دوره‌های آزمایش، بستر

مقایسه‌ای مناسبی را جهت تبیین تغییرات زمانی گونه‌های نیتروژن

در امتداد واحدهای تصفیه فراهم ساخت.

در تالاب‌های مصنوعی، حذف نیتروژن به‌جای یک مسیر منفرد،

تحت حاکمیت برهم‌کنش فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی

قرار دارد؛ به‌طوری‌که تبدیلات میکروبی بخش عمده و غالب این

فرآیندها را شکل داده و سازوکارهای وابسته به گیاه نیز سهم‌های

تکمیلی و متغیری را متناسب با ساختار بستر ایفا می‌کنند (Tang

et al., 2020; Katagi et al., 2021).

بر دبی ورودی تعیین شده و صرفاً معرف زمان ماند تئوریک هستند. با توجه به اینکه آزمون ردیاب (Tracer study) انجام نگرفته است، توزیع واقعی زمان ماند، تشکیل مسیرهای جریان ترجیحی، حوضچه‌های مرده و پدیده اتصال کوتاه هیدرولیکی قابل سنجش و برآورد کمی نبودند. این عدم انطباق‌های هیدرولیکی به عنوان یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در عملکرد تالاب‌های ساخته شده شناخته می‌شوند و به کارگیری مطالعات مبتنی بر ردیاب در تحلیل دقیق فرآیندی امری ضروری تلقی می‌گردد.

واحدهای واجد گیاه در تمامی زمان‌های ماند اسمی، همواره مقادیر عددی بالاتری از حذف TN را در مقایسه با بستر شاهد فاقد پوشش گیاهی ثبت کردند. برای نمونه، در زمان ماند اسمی ۵ روز، بازده حذف TN در بستر شاهد ۳۴/۶۷ درصد بود، درحالی‌که این مقدار در تیمار نی ۴۹/۹۱ درصد، در تیمار وتیور حدود ۴۹/۷۵ درصد و در تیمار کشت مخلوط به ۵۴/۳۲ درصد رسید. این رفتار مؤید آن است که حضور پوشش گیاهی در شرایط آزمایشی این تحقیق، با بهبود راندمان حذف نیتروژن همگام بوده است.

اختلاف مشاهده شده میان سیستم‌های پوشش‌دار و فاقد گیاه، از منظر مکانیکی کاملاً قابل توجیه است. ماکروفیت‌ها بستر ریزوسفر را از طریق فراهم‌آوری سطوح ریشه‌ای جهت اتصال و گسترش اجتماعات میکروبی، آزادسازی ترشحات آلی و اکسیژن، و تعدیل شرایط اکسیداسیون و احیای موضعی بازآرایی می‌کنند. با این حال، سهم نسبی این سازوکارها وابسته به گونه گیاهی و پیکربندی تالاب بوده و جذب مستقیم نیتروژن توسط بافت گیاهی ممکن است تنها بخش محدودی از کل نیتروژن حذف شده را شامل شود (Tang et al., 2020; Kataki et al., 2021).

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج عالم و همکاران (Aalam et al., 2022) که به ارزیابی عملکرد چهار پایلوت موازی تالاب زیرسطحی افقی در تصفیه فاضلاب شهری تحت شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری پرداختند، هم‌خوانی کلی دارد. در پژوهش یادشده، سیستم‌های واجد گیاه به حذف نیتروژنی در حدود ۳۶ تا ۴۱ درصد دست یافتند، درحالی‌که بستر شاهد راندمانی نزدیک به ۲۰ درصد ارائه داد. با این وجود، سیستم آزمایشی آنان از جنبه‌های بارگذاری هیدرولیکی، غلظت ورودی، گونه‌های گیاهی و شرایط عملیاتی تفاوت‌هایی با مطالعه حاضر داشت. از این‌رو، این هم‌پوشانی تجربی

ماند ۵ روز افزایش یافت. روندی مشابه در بستر پوشیده از نی معمولی (*Phragmites australis*) مشاهده شد؛ به نحوی که بازده حذف از ۴۶/۰۵ درصد به ۴۹/۹۱ درصد رسید. واحدهای واجد گیاه وتیور و کشت مخلوط نیز مقادیر بالاتری از حذف را به ثبت رساندند؛ به طوری که تیمار ترکیبی در زمان ماند اسمی ۵ روز به بالاترین راندمان عددی یعنی ۵۴/۳۲ درصد دست یافت. بدین ترتیب، در توالی عملیاتی اعمال شده در این پژوهش، افزایش زمان ماند اسمی از ۳ به ۵ روز، به طور کلی با افزایش عددی راندمان حذف TN همراه بوده است.

این الگو با مبانی هیدرولیکی شناخته شده در سیستم‌های وتلند سازگار است؛ چراکه زمان‌های ماند طولانی‌تر معمولاً زمان تماس میان جریان فاضلاب، سطوح بستر، بیوفیل‌ها و ناحیه ریزوسفر را افزایش داده و به طور هم‌زمان بارگذاری هیدرولیکی را کاهش می‌دهند. شواهد کمی متأخر نیز نشان می‌دهند که متغیرهای هیدرولیکی، به ویژه HRT، نقشی تعیین کننده بر راندمان حذف نیتروژن کل در تالاب‌های مصنوعی دارند؛ هرچند شدت و جهت این تأثیر به شدت وابسته به پیکربندی فیزیکی سیستم و متغیرهای راهبری است (Lam et al., 2024; Wu et al., 2023).

با این وجود، نتایج حاصل نباید به منزله اثبات یک رابطه علیتی مستقل از جانب HRT تلقی گردند. از آنجا که سه زمان ماند اسمی به صورت متوالی و به ترتیب در قالب دوره‌های ۵، ۴ و ۳ روز اعمال شدند، متغیر HRT ذاتاً با پیشرفت زمان آزمایش و احتمالاً با تغییرات زمانی در توسعه بیوفیل، رشد پوشش گیاهی، نوسانات کیفیت فاضلاب و شرایط اقلیمی تداخل آماری (Confounded) یافته است. این محدودیت روش شناختی در یک سیستم پایلوت فاقد تکرار فیزیکی هم‌زمان (Non-replicated) از اهمیت دوچندانی برخوردار است؛ زیرا تفکیک آماری تفاوت‌های ناشی از سطوح مختلف HRT از اثرات تغییرات زمانی میسر نیست. بنابراین، استنتاج دقیق علمی آن است که افزایش زمان ماند اسمی تحت شرایط مورد آزمون، صرفاً با مقادیر عددی بالاتر راندمان حذف نیتروژن کل همبستگی داشته است، نه اینکه لزوماً عامل علیتی و قطعی بهبود مشاهده شده باشد.

افزون بر این، ماهیت اسمی بودن زمان ماند نیز باید مورد توجه قرار گیرد. مقادیر محاسبه شده بر اساس حجم هیدرولیکی مؤثر تقسیم

گیاه، بیش از آنکه صرفاً حاصل جذب مستقیم توسط ریشه باشد، بازتابی از بهینه‌سازی شرایط محیطی در ریزوسفر است.

نکته قابل توجه در این نتایج، افزایش غلظت $\text{NO}_3^- - \text{N}$ در خروجی تمامی واحدهای آزمایشی بود. میانگین نیترات ورودی حدود $1/03$ میلی گرم در لیتر بود، درحالی که غلظت‌های پساب خروجی به مراتب بالاتر از این مقدار اندازه‌گیری شد. کاهش توأم $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ هم‌زمان با انباشت $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ، هم‌راستا با فرضیه اکسیداسیون ناقص فرم‌های احیاء نیتروژن در بستر تالاب است. این روند مشخصاً دلالت بر وقوع نیتریفیکاسیون در برخی ریزمحیط‌های هوازی یا دارای اکسیژن محلول دارد (Vymazal et al., 2021). با این حال، به دلیل عدم سنجش مستقیم متغیرهایی نظیر نرخ‌های اختصاصی نیتریفیکاسیون، پروفایل اکسیژن محلول (DO)، پتانسیل اکسیداسیون- احیا (ORP) و تنوع ژن‌های عملکردی جمعیت‌های میکروبی، داده‌های حاضر نمی‌توانند فرآیند نیتریفیکاسیون را به عنوان تنها سازوکار قطعی این افزایش معرفی کنند.

این تفکیک مفهومی از آن جهت حائز اهمیت است که تبدیل نیتروژن معادل حذف نهایی نیتروژن نیست. چنانچه نیترات حاصله متعاقباً وارد فرآیند دنیتریفیکاسیون نشده و یا به طریق دیگری از فاز آبی دفع نگردد، سیستم ممکن است علی‌رغم اکسیداسیون موفق آمونیوم، به بازدهی پایینی در حذف TN دست یابد. بررسی‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که پیوستگی و همگرایی میان دو فرآیند نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون، همگام با دسترسی به اکسیژن و دهنده الکترون، گلوگاه اصلی حذف نیتروژن در وتلندها را تشکیل می‌دهد (Tang et al., 2020).

ثبت نرخ انباشت عددی کمتر نیترات در سیستم‌های واجد گیاه (به‌ویژه تیمار ترکیبی)، می‌تواند بیانگر ظرفیت بالاتر این بسترها در نگهداشت یا تبدیل ثانویه نیترات در قیاس با بستر شاهد باشد (Tang et al., 2020). البته این تفسیر همچنان جنبه فرضیه‌ای دارد، زیرا مطالعه حاضر به اندازه‌گیری کمی نرخ‌های دنیتریفیکاسیون، انتشار گازهای نیتروژنی به جو، فراوانی میکروبی و موازنه جرم نپرداخته است. بنابراین، داده‌های مذکور باید به عنوان الگویی منطبق بر ارتقای فرآیندهای دگرگونی نیتروژن توصیف شوند، نه اثبات قطعی نرخ دنیتریفیکاسیون بالاتر.

گرچه موید معقولیت نتایج حاضر است، اما نباید مبنایی بر برتری ذاتی یک پیکربندی نسبت به دیگری قلمداد گردد.

از سویی دیگر، کشت مخلوط بالاترین بازده عددی حذف TN را در هر سه سطح HRT به ثبت رساند. هرچند این الگو می‌تواند افق‌های نوینی را در طراحی بسترها مطرح سازد، اما ساختار آزمایشگاهی حاضر اجازه استفاده از واژه هم‌افزایی یا سینرژی (Synergistic) را نمی‌دهد؛ چراکه برای هر تیمار گیاهی تنها یک واحد فیزیکی اختصاص داده شده بود و اندازه‌گیری‌های مکرر صبح و عصر، داده‌های وابسته درون یک واحد تکرار نشده محسوب می‌شوند، نه تکرارهای مستقل آماری. بر این اساس، ثبت مقادیر بالاتر در کشت مخلوط باید به عنوان یک رفتار تجربی ارزیابی شود که اثبات قطعی آن نیازمند تایید در آزمون‌های با تکرارهای مستقل است.

این رویکرد محتاطانه با ادبیات جامع علمی این حوزه سازگار است. مرورهای انتقادی اخیر تصریح می‌کنند که برهم‌کنش پیچیده میان فاکتورهای پوشش گیاهی، ماتریس بستر، شرایط هیدرولیکی، دما و مشخصات فاضلاب ورودی، تفکیک سهم مستقل گونه‌های گیاهی در راندمان نهایی تصفیه را با دشواری روبه‌رو می‌سازد (Vymazal et al., 2021; Wu et al., 2023).

راندمان حذف $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ روندی کاملاً منطبق با نتایج نیتروژن کل را نشان داد. میزان حذف در بستر شاهد بین $35/25$ تا $37/15$ درصد متغیر بود، درحالی که سیستم‌های واجد گیاه مقادیر عددی به مراتب بالاتری ارائه دادند؛ به‌طوری که تیمار نی بازدهی در حدود 50 تا 52 درصد، و تیمار حدود 51 تا 52 درصد و تیمار کشت مخلوط در زمان ماند ۵ روز راندمانی در حدود 56 درصد کسب کردند. این مشاهدات نمایانگر آن است که بسترهای گیاهی با کاهش مؤثرتر غلظت آمونیوم در فاز آبی مرتبط بوده‌اند.

حذف آمونیوم در بسترهای HSSF-CW می‌تواند از طریق چندین مسیر بیوشیمیایی و فیزیکی شامل نیتریفیکاسیون میکروبی، جذب گیاهی، تبادل یونی و جذب سطحی صورت پذیرد. در میان این عوامل، فرآیندهای میکروبی نقش اصلی دگرگونی نیتروژن را ایفا می‌کنند، درحالی که ریشه‌های گیاهی می‌توانند ساختار جامعه میکروبی و دسترسی موضعی به اکسیژن را تعدیل نمایند (Tang et al., 2020). از این رو، کاهش بیشتر آمونیوم در بسترهای دارای

پایلوت و کاربردی تصفیه‌کننده فاضلاب‌های بهداشتی/شهری قرار می‌گیرد. عالم و همکاران (Aalam et al., 2022) نیز در تصفیه فاضلاب شهری ضعیف در شرایط نیمه‌گرمسیری به راندمان حذف TN بین ۳۶ تا ۴۱ درصد در سیستم‌های HSSF دست یافتند. این هم‌گرایی در مرتبه مقادیر عملکردی، علی‌رغم ناهمگونی در بارگذاری هیدرولیکی، مشخصات کیفی ورودی، گونه‌های گیاهی و بازه زمانی آزمایش، حائز توجه است.

در سطحی کلان‌تر، فراتحلیل لم و همکاران (Lam et al., 2024) بر روی ۵۵ مقاله مشتمل بر ۱۶۳ مطالعه موردی تالاب در مقیاس پایلوت و واقعی نشان داد که متغیرهای طراحی و هیدرولیکی، به‌ویژه زمان ماند (HRT)، اصلی‌ترین محرک‌های تغییرات در راندمان حذف TN هستند. این محققان بر ضرورت ارزیابی دقیق منابع خطا و عدم قطعیت‌ها در مواردی که تحلیل‌ها صرفاً بر پایه میانگین و انحراف معیار ارائه می‌شوند تأکید داشته‌اند، که نشان‌دهنده اهمیت لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های فرآیندی در چنین مطالعاتی است.

همچنین انطباق عملکرد این سیستم با سوابق داخلی در ایران قابل بررسی است. قلی‌پور (Gholipour, 2025) در مرور ساختاریافته و فراتحلیل ۶۹ مقاله پژوهشی تالاب‌های تصفیه‌کننده در ایران از سال ۱۹۹۸ تاکنون، نشان داد که سیستم‌های زیرسطحی افقی (HSSF) متداول‌ترین الگوی تصفیه فاضلاب شهری بوده و گونه نی معمولی (*P. australis*) بیشترین فراوانی استفاده را داشته است؛ ضمن آنکه میانگین زمان ماند هیدرولیکی اسمی گزارش شده در مطالعات ایران $3/35 \pm 2/16$ روز بوده است. بنابراین، محدوده HRT اعمال شده در این تحقیق (۳ تا ۵ روز) کاملاً با بازه عملیاتی مرسوم در ادبیات علمی کشور هم‌پوشانی دارد (Gholipour, 2025). با این حال، از آنجا که پژوهش‌های پیشین در اقلیم‌ها و تحت الگوهای طراحی متفاوتی اجرا شده و سهم پایلوت‌های واقعی مقیاس بزرگ در آن‌ها محدود است، داده‌های این مطالعه باید به‌مثابه شواهد میدانی و منطبق بر اقلیم گرم و نیمه‌خشک تلقی شوند، نه شاخصی جهان‌شمول برای تمامی وتلندهای افقی در پهنه جغرافیایی کشور. از ویژگی‌های تعیین‌کننده بستر محیطی در منطقه دزفول، حاکمیت اقلیم گرم و نیمه‌خشک است. پتانسیل بالای تبخیر و تفرق اتمسفری می‌تواند افت محسوس حجم پساب خروجی را از طریق

حذف نسبتاً متوسط نیتروژن کل در مقایسه با راندمان قابل‌توجه حذف آمونیوم، توأم با تجمع نیترات، مؤید این نکته است که چالش و محدودیت اصلی سیستم، اکسیداسیون اولیه آمونیوم نبوده، بلکه تکمیل مسیرهای پایین‌دست چرخه نیتروژن (به‌ویژه احیای نیترات) بوده است. در بسترهای زیرسطحی افقی، احیای نیترات از مسیر دنیتریفیکاسیون نیازمند شرایط بی‌هوازی/کاهش‌ی مناسب و حضور اهداکننده الکترون (ماده آلی کربنی) کافی است، درحالی‌که نیتریفیکاسیون به تأمین کافی اکسیژن وابستگی دارد. در نتیجه، راندمان نهایی چرخه نیتروژن به استقرار هم‌زمان و فضایی - زمانی شرایط ردوکس ناهمگن وابسته است، نه به یک محیط کاملاً یکنواخت هوازی یا بی‌هوازی (Tang et al., 2020).

اگرچه میانگین COD فاضلاب ورودی حدود ۲۳۷ میلی‌گرم در لیتر بود، اما تکیه صرف بر این مقدار، جهت اثبات وجود محدودیت منبع کربن برای دنیتریفیکاسیون کافی نیست؛ زیرا بخش قابل‌توجهی از COD کل می‌تواند متشکل از ترکیبات دیرزیست و غیرقابل‌تجزیه بیولوژیکی باشد. بنابراین، مستندات تجربی موجود برای اثبات قطعی این فرضیه که کمبود کربن زیست‌دسترس عامل انباشت نیترات بوده است، کفایت نمی‌کند. تبیین قطعی این مسئله مستلزم تفکیک و اندازه‌گیری مقادیر COD زیست‌تخریب‌پذیر یا کربن آلی محلول (DOC) در امتداد طول بستر و همبستگی آن با پروفایل‌های DO و پتانسیل ردوکس خواهد بود.

این رویکرد، درک روشنی از تفاوت راندمان‌های حذف NH_4^+-N و TN به دست می‌دهد: پایلوت مورد آزمون در تبدیل بخش عمده آمونیوم ورودی موفق عمل نموده، اما در حذف فرم‌های اکسیدشده نیتروژن با افت راندمان مواجه شده است. از این‌رو، راهکارهای نوین تشدید فرآیندی که در ادبیات پژوهشی اخیر بدان‌ها اشاره شده است نظیر بهبود ظرفیت انتقال اکسیژن، هوادهی متناوب، مدیریت هیدرولیکی پویا، تزریق هدفمند اهداکننده الکترون و توسعه سیستم‌های ترکیبی (Hybrid) می‌توانند گزینه‌های بالقوه مؤثری برای ارتقای راندمان خالص حذف نیتروژن باشند؛ هرچند اثبات قابلیت اجرایی آن‌ها بر این سیستم، نیازمند مطالعات تکمیلی آتی است (Wu et al., 2023).

دامنه راندمان حذف نیتروژن کل در این پژوهش (۳۱/۱۲ تا ۵۴/۳۲ درصد)، در محدوده گزارش شده برای تالاب‌های مصنوعی مقیاس

توالی عملیاتی مذکور توصیف می‌کند، اما فاقد ساختار فاکتوریل تصادفی شده جهت اثبات اثرات مستقل گیاه و HRT است. مقالات مروری متأخر نیز بر ضرورت گذار به طراحی‌های تجربی پایدار، بلندمدت و دارای کنترل‌های چندگانه جهت تعمیم یافته‌ها به پروژه‌های اجرایی مقیاس واقعی تأکید می‌ورزند (Vymazal et al., 2021; Wu et al., 2023)

بر این مبنا، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی از بسترهای فیزیکی مستقل برای هر متغیر استفاده شده، سطوح زمان ماند به‌صورت تصادفی یا متقاطع اعمال گردند و فرآیند پایش در چرخه‌های فصلی چندگانه توأم با بیلان هیدرولیکی و جرمی پیوسته انجام گیرد. همچنین بهره‌گیری از آزمون‌های ردیاب هیدرولیکی به‌منظور ترسیم منحنی توزیع واقعی زمان ماند، و ارزیابی کمی متغیرهایی نظیر DO، ORP، کربن آلی تجزیه‌پذیر و سنجش نیتروژن انباشته‌شده در زیست‌توده گیاهی، می‌تواند مرزبندی دقیق میان سازوکارهای نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، جذب گیاهی و سایر مسیرهای تبادل نیتروژن را میسر سازد. چنین چارچوبی امکان گذار از نتایج توصیفی صرف به استنتاجهای قطعی مکانیکی و دارای پشتوانه محکم آماری را فراهم خواهد آورد.

در مجموع، پژوهش حاضر اثبات می‌نماید که تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی افقی از توانایی مطلوبی در تقلیل غلظت‌های نیتروژن کل و آمونیوم تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه‌خشک برخوردارند؛ ضمن آنکه ضرورت تفکیک مفهومی میان دگرگونی فرم‌های نیتروژن و حذف نهایی آن از فاز آبی را آشکار می‌سازد. دستاوردهای حاصل، استفاده از این سیستم‌های کم‌مصرف و متکی بر طبیعت را در تصفیه فاضلاب شهری مناطق گرمسیری مورد تأیید قرار می‌دهند؛ هرچند این داده‌ها باید به‌عنوان یافته‌های بومی و توصیفی تحلیل شده و از تعمیم قطعی آن‌ها در اثبات برتری مطلق یک گونه گیاهی خاص یا زمان ماند مشخص اجتناب گردد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه عملکرد توصیفی یک سامانه پایلوت تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (HSSF-CW) را در تصفیه فاضلاب شهری تحت شرایط اقلیمی گرم و نیمه‌خشک دزفول، ایران، ارزیابی کرد. در شرایط بهره‌برداری مورد بررسی، حذف نیتروژن کل (TN) در

فرآیندهای تبخیر فیزیکی از سطح بستر و تعرق گیاهی به همراه داشته باشد؛ عاملی که موجب افزایش غلظت املاح و برهم خوردن تناسب ساده میان غلظت ورودی و خروجی می‌گردد. با توجه به اینکه راندمان‌های حذف در این پژوهش صرفاً بر مبنای غلظت ورودی و خروجی محاسبه شده‌اند، این داده‌ها معرف راندمان‌های مبتنی بر غلظت (Concentration-based) هستند و نباید مستقیماً معادل راندمان‌های بار جرمی واقعی (Mass-based) قلمداد شوند.

بدون اندازه‌گیری پیوسته دبی ورودی و خروجی و تدوین یک بیلان هیدرولیکی کامل و بسته، تعیین سهم دقیق تلفات ناشی از تبخیر و تعرق و تعدیل عددی راندمان جرمی از نظر علمی توجیه‌پذیر نیست. مطالعات تکمیلی آتی در مناطق گرمسیری باید به‌طور هم‌زمان اقدام به ثبت دبی‌های جریان، نوسانات تراز آب، بارندگی و پتانسیل تبخیر و تعرق نمایند تا امکان تبدیل داده‌های کیفی غلظت‌محور به بارهای جرمی فراهم شود. تلفیق این پایش هیدرولیکی با مطالعات ردیابی، مبنای محکم‌تری را جهت تفکیک افت غلظت ناشی از واکنش‌های زیستی از اثرات تلغیظ هیدرولوژیکی پدید خواهد آورد.

محدودیت عمده متدولوژی این پژوهش، فقدان بسترهای فیزیکی مستقل موازی (True replication) برای هر یک از تیمارهای پوشش گیاهی است. اگرچه نمونه‌برداری‌های متوالی طی روزهای متوالی و در ساعات مختلف شبانه‌روز انجام شد، اما این داده‌ها معرف پایش زمانی درون یک سیستم منفرد بوده و از دیدگاه آماری تکرار مستقل تجربی محسوب نمی‌شوند. بنابراین، شاخص‌های انحراف معیار (SD) و ضریب تغییرات (CV) گزارش شده، تغییرپذیری زمانی مشاهدات در هر واحد را نشان می‌دهند، نه واریانس بین سیستم‌های مشابه. این تمایز ساختاری هنگام تفسیر اختلاف عملکرد میان تیمارهای مختلف گیاهی نقشی کلیدی دارد.

محدودیت روش‌شناختی دوم، اجرای متوالی و غیرتصادفی سطوح مختلف HRT بوده است. به‌واسطه پیوستگی زمانی اعمال زمان‌های ماند، بخش نامعلومی از تغییرات عملکردی که به HRT نسبت داده می‌شود، می‌تواند حاصل فرآیندهای هم‌زمان با زمان آزمایش از جمله تکامل ساختاری بیوفیلم، بلوغ و سلامت سیستم ریشه‌ای و یا نوسانات فصلی دما باشد. در نتیجه، این تحقیق رفتار پایلوت را تحت

نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون، پروفایل‌های اکسیژن محلول (DO) و پتانسیل اکسایش-کاهش (ORP)، جوامع میکروبی و بیلان جرمی نیتروژن به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشدند، سهم مسیرهای منفرد حذف نیتروژن را نمی‌توان بر اساس داده‌های حاضر کمی‌سازی کرد.

یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که راندمان‌های حذف محاسبه‌شده بر مبنای غلظت باید در اقلیم‌های گرم با احتیاط تفسیر شوند؛ زیرا تبخیر-تعرق می‌تواند بیلان هیدرولیکی سامانه را تحت تأثیر قرار دهند. تعیین توزیع واقعی زمان ماند و حذف آلاینده بر مبنای جرم، مستلزم انجام آزمون ردیاب هیدرولیکی و اندازه‌گیری پیوسته دبی جریان ورودی و خروجی خواهد بود.

در مجموع، این مطالعه پایلوت شواهد توصیفی و اختصاصی از محل ارائه می‌دهد که تالاب‌های مصنوعی HSSF دارای پوشش گیاهی می‌توانند در شرایط گرم و نیمه‌خشک به کاهش NH_4^+-N و TN در فاضلاب شهری کمک کنند. یافته‌های این مطالعه مبنایی برای تحقیقات آینده فراهم می‌کنند، نه یک رتبه‌بندی قطعی از انواع پوشش گیاهی یا HRT‌ها. مطالعات آینده باید شامل تکرار آزمایشی مستقل، تصادفی‌سازی ترتیب اعمال HRT ها، پایش چندفصلی، آزمون ردیاب هیدرولیکی و بیلان کامل جرمی نیتروژن باشند تا مبنای آماری و سازکارهای فرآیندی الگوهای مشاهده‌شده با اطمینان بیشتری مشخص شوند.

References

- Aalam, T., Arias, C. A., & Khalil, N. (2022). Physicochemical and biological contribution of native macrophytes in the constructed wetlands to treat municipal wastewater: A pilot-scale experiment in a sub-tropical climate region. *Recycling*, 7(1), Article 8. <https://doi.org/10.3390/recycling7010008>
- Afrous, A., Goudarzi, S., & Liaghat, A. (2011). Phytoremediation by some species of aquatic plants for As and Hg removal (Case study: Dezful, Iran). *Advances in Environmental Biology*, 5(11), 3629–3635. <https://www.aensiweb.com/old/aeb/2011/3629-3635.pdf>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA-AWWA-WEF. <https://secure.apha.org/imis/ItemDetail?CATEGORY=BK&iProductCode=978-087553-2998>
- Baskar, G., Deeptha, V. T., & Rahman, A. A. (2014). Root zone technology for wastewater treatment: A review.

محدوده ۳۱/۱۲ تا ۵۴/۳۲ درصد و حذف نیتروژن آمونیومی (NH_4^+-N) تقریباً در محدوده ۳۵/۲۵ تا ۵۶/۰۸ درصد قرار داشت. نتایج نشان داد که سامانه، بدون استفاده از هوادهی مصنوعی یا افزودن مواد شیمیایی خارجی، توانایی کاهش غلظت نیتروژن کل و آمونیوم را داشت.

افزایش زمان ماند هیدرولیکی اسمی (HRT) از ۳ به ۵ روز، به‌طور کلی با افزایش میزان عددی حذف TN در واحدهای آزمایشی همراه بود. با این حال، از آنجا که HRT ها به‌صورت متوالی اعمال شدند و در نتیجه با زمان اجرای آزمایش درهم‌تنیده بودند، این الگو نباید به‌عنوان شواهد قطعی از اثر مستقل و علی HRT تفسیر شود.

واحدهای دارای پوشش گیاهی عموماً حذف عددی بیشتری از TN و NH_4^+-N نسبت به واحد شاهد بدون گیاه نشان دادند. کاشت ترکیبی بالاترین حذف عددی TN را در شرایط مورد آزمایش، به‌ویژه در HRT اسمی ۵ روز، نشان داد. با این حال، نبود تکرار فیزیکی مستقل مانع از تأیید آماری برتری هر یک از تیمارهای گیاهی می‌شود. و تیور نیز عملکرد عددی بالایی را به‌طور نسبتاً پایدار نشان داد و از این رو، به‌ویژه در شرایط اقلیمی گرم و محدودیت منابع آب، شایسته بررسی بیشتر در مطالعات دارای تکرار واقعی است.

کاهش هم‌زمان NH_4^+-N و افزایش NO_3^--N نشان می‌دهد که تبدیل‌های نیتروژنی در داخل تالاب رخ داده‌اند و با اکسیداسیون جزئی آمونیوم سازگار هستند. با این حال، از آنجا که نرخ‌های

International Journal of ChemTech Research, 6(7), 3705–3712.

https://www.researchgate.net/publication/286282718_Root_zone_technology_for_campus_waste_water_treatment

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, Article 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

- Danh, L. T., Truong, P., Mammucari, R., Tran, T., & Foster, N. (2009). Vetiver grass, *Chrysopogon zizanioides*: A choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic pollutants. *International Journal of Phytoremediation*, 11(8), 664–691. <https://doi.org/10.1080/15226510902787302>

- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Gholipour, A. (2025). Treatment wetlands in Iran: A review. *Ecological Engineering*, 212, 107494. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107494>
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, 54(2), 187–211. <https://doi.org/10.2307/1942661>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.). CRC Press. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, 283, Article 111986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111986>
- Khuzestan Province Meteorological Department. (2024). Decadal agro-meteorological statistics and historical climatic series of Dezful Station (2013–2023). Ministry of Roads and Urban Development, Iran. <https://irimo.ir/far/wd/2703.html>
- Lam, V. S., Tran, T. C. P., Vo, T.-D.-H., Nguyen, D. D., & Nguyen, X. C. (2024). Meta-analysis review for pilot and large-scale constructed wetlands: Design parameters, treatment performance, and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 927, Article 172140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172140>
- OpenAI DALL-E 3. (2024). Large language and image generation model. <https://chat.openai.com>
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rahman, M. E., Bin Halmi, M. I. E., Bin Abd Samad, M. Y., Uddin, M. K., Mahmud, K., Abd Shukor, M. Y., Sheikh Abdullah, S. R., & Shamsuzzaman, S. M. (2020). Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8339. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental and operational factors. *Journal of Environmental Management*, 112, 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Stefanakis, A. I. (2020). Constructed wetlands for sustainable wastewater treatment in hot and arid climates: Opportunities, challenges and case studies in the Middle East. *Water*, 12(6), 1665. <https://doi.org/10.3390/w12061665>
- Swarnakar, A. K., Bajpai, S., & Ahmad, I. (2022). Various Types of Constructed Wetland for Wastewater Treatment—A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1032(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1032/1/012026>
- Tang, S., Liao, Y., Xu, Y., Dang, Z., Zhu, X., & Ji, G. (2020). Microbial coupling mechanisms of nitrogen removal in constructed wetlands: A review. *Bioresource Technology*, 314, Article 123759. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123759>
- UN-Habitat. (2008). *Constructed wetlands manual: Guidance on decentralized wastewater treatment in developing countries*. United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org/constructed-wetlands-manual>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters (Manual EPA/625/R-99/010)*. Office of Research and Development. <https://www.loc.gov/resource/gdcmassbookdig.constructedwetla00nati/?st=grid>
- Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*, 755, 142540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142540>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *Science of the total environment*, 407(13), 3911–3922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.032>
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>
- Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>
- Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 218–234. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>